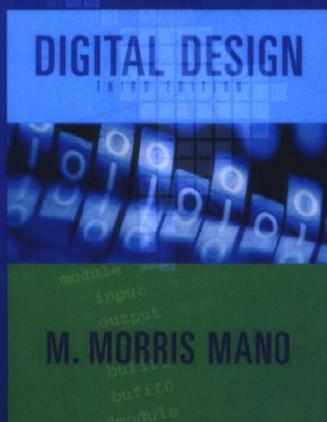


国外电子与通信教材系列

数字设计

(第三版)

Digital Design Third Edition



[美] M. Morris Mano 著
徐志军 尹廷辉 等译

PEARSON
Prentice
Hall



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

数 字 设 计

(第三版)

Digital Design

Third Edition

[美] M. Morris Mano 著

徐志军 尹廷辉 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是一本系统介绍数字电路设计的专著。全书共分12章,内容涉及数字逻辑的基本理论,数字逻辑电路设计的基本原理与方法,存储器与可编程逻辑器件,数字集成电路及其相关实验,Verilog HDL硬件描述语言与数字系统设计技术等。本书结构严谨,选材新颖,深入浅出,内容紧密联系实际,可作为电子工程、通信工程和计算机科学与技术等相关专业的教材,也是电子设计工程师的一本优秀参考书。

Simplified Chinese edition Copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Digital Design, Third Edition, ISBN: 0130621218 by M. Morris Mano. Copyright © 2002. All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2002-5705

图书在版编目(CIP)数据

数字设计(第三版)/(美)马诺(Mano, M. M.)著;徐志军等译. -北京:电子工业出版社, 2004.4
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Digital Design, Third Edition

ISBN 7-5053-9714-1

I. 数... II. ①马... ②徐... III. 数字电路-电路设计 IV. TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第015385号

责任编辑:史 平

印 刷:北京兴华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787 × 1092 1/16 印张:26.5 字数:678千字

印 次:2004年4月第1次印刷

定 价:39.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师 移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	阮秋琦	北方交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	徐重阳	华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、教材建设委员会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社副社长

译 者 序

现在,人类已经进入到数字时代。数字系统在我们的日常生活中起着越来越重要的作用,并广泛应用于通信、计算机、控制、导航、互联网等领域。从数字电话到数字电视,从数字通用光盘到数字计算机,从家用娱乐设备 CD、DVD 到军用雷达、医用 CT 仪器设备,数字技术的应用随处可见。由于数字技术在处理和传输信息方面的各种优点,数字电路得到了非常广泛的应用。

对于电子工程、信息工程、计算机科学与技术等专业,“数字电路与逻辑设计”是一门非常重要的专业基础课。对于每一个工科电子信息类专业的学生 and 设计工程师,数字电路的基础知识是必备常识。我们翻译本书的目的正是要为电子工程、信息工程专业和其他相近专业的本科生提供一本合适的教科书。

数字设计经历了从单元电路到系统电路、从小规模电路到大规模集成电路的发展过程。随着微电子技术和信息处理技术的飞速发展,各种类型的数字集成电路不断推出并广泛应用于各种技术领域,数字电路与数字系统的设计方法与设计手段也发生了很大的变化。利用 EDA 设计工具和可编程逻辑器件,采用先进的硬件描述语言已经成为当今数字设计技术的主流。

M. Morris Mano 撰写的《数字设计》是一本系统介绍数字电路与系统设计理论和技术的巨著,自本书第一版出版以来已经被许多所著名大学选做教材。我们翻译的是这本书的第三版,其主要内容包括二进制与布尔代数基础,数字逻辑门,组合逻辑电路的分析与设计,时序逻辑电路的分析与设计,存储器与可编程逻辑器件,数字集成电路与实验室实验,Verilog 硬件描述语言及其应用等。书中有大量的例题,以帮助读者更好地理解所学的知识。每章末尾都附有大量的习题,这些习题中的一部分是为巩固已学知识而设立的,另一部分则是为开拓学生视野、紧密联系工程实际而设立的。全书内容系统完整、结构新颖、理论严谨、深入浅出,是一本不可多得的好教材。

本书由徐志军负责翻译前言、第 1 章至第 4 章、第 10 章,尹廷辉负责翻译第 5 章至第 9 章,第 11 章和第 12 章由徐志军和尹廷辉共同翻译。全书由徐志军统稿审校。解放军理工大学通信工程学院电子技术教研室的硕士研究生谢波、杨承富、张春生协助完成了部分章节的翻译工作,在此特别向他们致以深切的谢意。

数字设计是一门正在发展的技术,涉及面广,技术更新快,新器件不断涌现。由于译者学识所限,疏漏乃至错误在所难免,敬请读者指正。

前 言

数字设计指的是数字电子电路设计。数字电路主要用于数字计算机、数据通信、数字记录器以及其他许多需要数字硬件的应用系统的设计和构造。本书介绍了数字电路设计的基本工具,给出了数字系统设计的基本概念,可作为电子工程、计算机工程或计算机科学入门课程的教材。

除了内容的重新安排或由于技术的改变而导致的重点改变外,第三版保留了前两版的许多特征。组合电路编排为一章内容而不是前两版采用的两章。时序电路章节重点介绍了利用 D 触发器的设计,而不是利用 JK 和 SR 触发器的设计。存储器与可编程逻辑的内容安排在同一章。第 8 章修订成包含寄存器传输级(RTL, register transfer level)设计程序。

第三版主要修订了关于 Verilog 硬件描述语言(HDL, Hardware Description Language)的章节内容。HDL 内容在各章作为独立的一节,根据需要可以选择是否跳过这部分内容。针对那些第一次学习数字电路和硬件描述语言的初学者,适当地介绍了 HDL 的基础知识:

- 第 1 章到第 3 章介绍了数字电路,第 3.9 节介绍了 Verilog HDL。
- 接着是组合电路的学习,第 4.11 节进一步讨论了 HDL。
- 第 5 章和第 6 章介绍了时序电路,相应的 HDL 示例在第 5.5 节和第 6.6 节介绍。
- 第 7.2 节介绍了存储器的 HDL 描述。
- 第 8.2 节介绍了用于 Verilog HDL 的 RTL 符号。
- RTL 的 HDL 描述示例以及层次结构分别在第 8.5 节和第 8.8 节中介绍。
- 第 10.10 节讨论了对应于 CMOS 电路的开关级建模。
- 第 11.19 节增补了第 11 章中 HDL 实验的硬件实验内容。现在实验室中设计的电路可以用硬件组件或 HDL 模拟仿真进行验证。

与本书配套的内容包括书中示例的 Verilog HDL 源代码文件,以及两个 SynaptiCAD 模拟器。^① 第一个模拟器是 VeriLogger Pro,它是一个传统的 Verilog 仿真工具,可以用来仿真书中的 HDL 示例,验证 HDL 的习题答案。第二个模拟器是一种新型模拟技术,称为互动式模拟器。这种模拟器允许设计工程师在一个完整的仿真模型或原理图建立之前对设计思想进行模拟和分析。这项技术对学生尤其有用,因为他们可以很快地进入布尔代数和 D 触发器或锁存器输入方程,从而验证其等价性,或做 D 触发器和锁存器设计的实验。在提供的 HTML 文件以及 SynaptiCAD 安装指南的 MS Word 文档说明中,包含本书的指南。

其他的信息可以在与本书有关的网站上查询,即 <http://www.prenhall.com./mano>。其中包含本书所有可供下载的 Verilog HDL 示例、PDF 格式的图和表、书中示例的 Verilog 软件使用指南等。

下面简要介绍各章要点以及本版所做的主要修订。

^① 可从电子工业出版社教育资源网 (<http://edu.phei.com.cn/>) 上下载——编者注。

第1章介绍了用于表达数字系统信息的各种二进制记数法。解释了二进制数和二进制代码,给出了带符号的二进制数及BCD十进制数的加减法示例。

第2章介绍了布尔代数的基本定理,描述了布尔表达式和与其对应的逻辑图之间的相互关系,研究了两个逻辑变量的所有可能的逻辑运算,在此基础上确定了在数字系统设计中最有用的逻辑门。本章还提及集成门电路的一些特性,而集成逻辑门电子电路将在第10章中进行详细分析。

第3章介绍了布尔表达式的卡诺图化简法。卡诺图法也可以用于简化由“与或”门、“与非”门或“或非”门构成的数字电路。此外,讨论了其他所有可能的两级门电路及其实现方法,介绍了Verilog HDL用于简单门级建模的例子。

第4章概述了组合电路分析和设计的格式步骤。设计示例介绍了数字系统设计的一些基本组件,如加法器和代码变换器等。解释了一些经常使用的并行加法器和减法器、译码器、编码器和数据选择器等数字逻辑函数,并且说明了这些数字逻辑在组合电路设计中的用法。给出了门级建模、数据流建模和行为建模的HDL例子,展示了用Verilog HDL描述组合电路的各种不同的方法。介绍如何编写简单的测试平台程序,为HDL设计提供激励。

第5章概述了同步时序电路分析和设计的格式步骤。介绍了几种类型触发器的逻辑门结构,同时还讨论了电平触发与边沿触发的差别。用几个特定的例子介绍了时序电路分析中状态表和状态图的推导。列举的几个设计例子强调了如何使用D触发器设计时序电路。说明了用Verilog HDL对时序电路的行为建模。给出了几个说明米里型和摩尔型时序电路的HDL例子。

第6章描述了诸如寄存器、移位寄存器和计数器等各种时序电路组件,这些数字组件是构成复杂数字系统的基本构造块。还介绍了移位寄存器和计数器的HDL描述。

第7章描述了随机存取存储器和可编程逻辑器件,讨论了存储器译码和纠错方案,介绍了一些组合和时序的可编程逻辑器件,如ROM、PAL、CPLD和FPGA等。

第8章描述了数字系统的寄存器传输级的表示方法,介绍了算法状态机(ASM, algorithmic state machine)流程图,用几个例子说明了ASM流程图、RTL表示和数字系统设计中HDL描述的用法。本章是本书中最重要的章节,为学生提供了先进的设计方法。

第9章介绍了异步时序电路分析和设计的格式步骤。概要说明了如何用一个带反馈的组合电路来实现异步时序电路的方法。还描述了另外一种用SR锁存器作为存储元件来实现异步时序电路的方法。

第10章介绍了最通用的集成电路数字逻辑系列。用电子电路理论对每个系列中的基本门电路进行了分析,要完全理解本章的内容需要掌握电子电路的基本知识。Verilog 开关级描述的例子说明了仿真MOS和CMOS管电路的能力。

第11章简述了一些可以在实验室里完成的硬件实验,这些硬件在市场上很容易买到。实验用集成电路的功能可以参见前几章中介绍的相似组件的原理图。这里非正式地给出了每项实验的内容,希望学生设计出电路图,并编制一个程序以检查实验电路的工作情况。最后一节给出了相应的HDL实验内容。在构造硬件之前,学生可以用本书配套的Verilog HDL软件来仿真和检查设计的正确性。

第12章介绍了ANSI/IEEE标准推荐的逻辑函数标准图形符号。这些图形符号用来表示一些SSI和MSI部件,以便用户可以从惟一分配的图形符号中辨认每个逻辑函数。本章展示

了实验用集成电路的标准图形符号。本书介绍的各种数字部件类似于商用集成电路。不过，除了在第 11 章和第 12 章之外，正文并没有提及专用集成电路。学习了教科书中的理论知识后，可以通过练习第 11 章中建议的实验项目来提高数字设计的实践能力。

每章都列出了参考文献和习题，本书的最后还给出了某些习题的答案，以帮助学生和自学者掌握书中的知识。

感谢 Charles Kime 向我介绍了 Verilog，特别要感谢 Jack Levine 先生给我的指导，感谢他对部分章节、示例和所有的 Verilog HDL 习题内容所做的核对工作。感谢 Tom Robbins 先生帮助我下决心写第三版，感谢我的编辑 Eric Frank 对整个修订工作的耐心。还要感谢第三版的审校者：加利福尼亚州立大学的 Thomas G. Johnson，纽约大学的 Umit Uyar，Clemson 大学的 Thomas L. Drake 和 Toledo 大学的 Richard Molyet。最后，我要衷心感谢我的妻子 Sandra 给我的鼓励和支持。

目 录

第 1 章 二进制	1
1.1 数字系统	1
1.2 二进制数	2
1.3 数制的转换	4
1.4 八进制和十六进制数	6
1.5 补码	7
1.6 带符号位的二进制数	10
1.7 二进制码	13
1.8 二进制数存储与寄存器	19
1.9 二进制逻辑	21
1.10 习题	24
1.11 参考文献	26
第 2 章 布尔代数和逻辑门	27
2.1 基本定义	27
2.2 布尔代数的公理化定义	28
2.3 布尔代数的基本定理和性质	30
2.4 布尔函数	32
2.5 规范和标准式	36
2.6 其他逻辑运算	41
2.7 数字逻辑门	43
2.8 集成电路	47
2.9 习题	49
2.10 参考文献	51
第 3 章 门电路的化简	52
3.1 图形法化简	52
3.2 四变量卡诺图	56
3.3 五变量卡诺图	59
3.4 和之积的化简	61
3.5 无关条件	64
3.6 电路的与非门和或非门实现	65
3.7 其他的两级电路实现	71
3.8 异-或函数	74
3.9 硬件描述语言	79

3.10 习题	85
3.11 参考文献	88
第 4 章 组合逻辑	89
4.1 组合电路	89
4.2 分析步骤	90
4.3 设计步骤	92
4.4 二进制加-减器	94
4.5 十进制加法器	102
4.6 二进制乘法器	104
4.7 数值比较器	106
4.8 译码器	107
4.9 编码器	110
4.10 多路转换器	113
4.11 组合电路的硬件描述语言	117
4.12 习题	129
4.13 参考文献	133
第 5 章 同步时序逻辑	134
5.1 时序电路	134
5.2 锁存器	135
5.3 触发器	138
5.4 同步时序电路分析	143
5.5 用 HDL 描述时序电路	152
5.6 状态化简和分配	159
5.7 设计过程	163
5.8 习题	169
5.9 参考文献	173
第 6 章 寄存器和计数器	174
6.1 寄存器	174
6.2 移位寄存器	176
6.3 环形计数器	182
6.4 同步计数器	186
6.5 其他计数器	191
6.6 用 HDL 描述寄存器和计数器	195
6.7 习题	200
6.8 参考文献	203
第 7 章 存储器和可编程逻辑器件	204
7.1 概述	204
7.2 随机存取存储器	205
7.3 存储器译码	209

7.4	检纠错	213
7.5	只读存储器	216
7.6	可编程逻辑阵列	220
7.7	可编程阵列逻辑	223
7.8	时序可编程器件	226
7.9	习题	229
7.10	参考文献	232
第 8 章	寄存器传输级	233
8.1	寄存器传输级定义	233
8.2	HDL 的寄存器传输级描述	234
8.3	算法状态机	239
8.4	设计示例	243
8.5	设计示例的 HDL 描述	249
8.6	二进制乘法器	254
8.7	控制逻辑	257
8.8	二进制乘法器的 HDL 描述	261
8.9	乘法器设计	265
8.10	习题	270
8.11	参考文献	273
第 9 章	异步时序逻辑	275
9.1	概述	275
9.2	分析步骤	276
9.3	由锁存器构成的电路	282
9.4	设计步骤	288
9.5	状态表和流程表的简化	293
9.6	无竞争的状态分配	299
9.7	冒险	303
9.8	设计示例	307
9.9	习题	312
9.10	参考文献	317
第 10 章	数字集成电路	318
10.1	引言	318
10.2	专用特征	319
10.3	双极型晶体管特性	323
10.4	RTL 和 DTL 电路	326
10.5	晶体管-晶体管逻辑	327
10.6	发射极耦合逻辑	335
10.7	金属氧化物半导体	336
10.8	互补型 MOS	338

10.9	CMOS 传输门电路	341
10.10	HDL 的开关级建模	343
10.11	习题	346
10.12	参考文献	348
第 11 章	实验	349
11.1	实验介绍	349
11.2	二进制和十进制	353
11.3	数字逻辑门	355
11.4	布尔函数的化简	356
11.5	组合电路	358
11.6	代码转换	359
11.7	使用多路选择器进行设计	360
11.8	加法器和减法器	362
11.9	触发器	364
11.10	时序电路	365
11.11	计数器	367
11.12	移位寄存器	368
11.13	串行加法	371
11.14	存储器单元	372
11.15	灯式手球	373
11.16	时钟脉冲发生器	376
11.17	并行加法器和累加器	378
11.18	二进制乘法器	380
11.19	异步序列电路	381
11.20	Verilog HDL 模拟实验	382
第 12 章	标准图形符号	385
12.1	矩形符号	385
12.2	限定符号	387
12.3	相关符号	389
12.4	组合部件的符号	390
12.5	触发器的符号	392
12.6	寄存器的符号	393
12.7	计数器的符号	395
12.8	RAM 的符号	397
12.9	习题	397
12.10	参考文献	398
部分习题解答		399

第1章 二 进 制

1.1 数字系统

目前,人类已经进入到数字时代。数字系统在我们的日常生活中起着越来越重要的作用,并广泛地应用于通信、商贸、交通控制、导航、医疗、天气监测、因特网等领域以及其他许多商业、工业和科研部门。从数字电话到数字电视,从数字通用光盘到数字相机、数字计算机,数字技术的应用随处可见。由于有着很强的通用性,数字计算机可以执行一系列的指令和程序,并对给定的数据进行操作。用户可以用它来运行程序,也可以根据特定的要求对程序或数据进行修改。正因为有这种灵活性,通用的数字计算机才可以完成各种各样的信息处理任务,从而得到非常广泛的应用。

数字系统的一个显著特性就是它具有处理离散信息的能力。我们知道,任何一个取值数目有限的元素集都包含着离散的信息,如十进制的各个数、字母表中的 26 个字母、扑克牌中的 52 张牌以及国际象棋盘的 64 个方格等。早期的数字计算机主要用于数值计算,它处理的离散信息是各种各样的数字,因此出现了“数字计算机”这个术语。数字系统中的离散信息元素可以用一类称为“信号”的物理量来表示,而最常见的“信号”就是电压信号和电流信号,这种“信号”一般由晶体管构成的电路所产生。目前,在各种数字电子系统中的电信号只有两个离散值,因而称为二进制。一个二进制数又称为一个比特,它有两个基本的数值:“0”和“1”。离散信息单元可以用一个比特组(二进制码)来表示。例如,在一个数字系统中,十进制数 0 到 9 可以用一个 4 比特码组来表示。通过使用多种技术,用比特组来表示各种离散符号,从而可以用数字的方式来研究一个系统。因此,数字系统就是一个处理二进制离散信息单元的系统。

离散信息量可能在处理自然数时出现,或者来自于对一个连续过程的量化。例如,工资表就是一个自然的离散信息处理过程,它包含了雇员姓名、社会保险号、薪水和所得税等。员工的工资单可以用字母(姓名)、数字(薪水)以及一些特殊符号(如\$)等离散数值来处理。另一方面,进行研究的科学家在观察一个连续的过程时,一般都是以表格的形式来记录特定时刻的数值。科学家就是这样对连续的数据进行量化,并将表中的每一个数赋予一个离散量。在很多情况下,量化处理可以由一个模/数转换器来自动完成。

通用的数字计算机就是一个最典型的数字系统,其主要组成部分是存储器、中央处理器以及输入/输出单元。存储器用于存储程序、输入/输出数据以及中间数据。中央处理单元依照特定的程序执行算术运算和其他数据处理操作。用户要通过键盘这种输入设备将程序和数据输送到存储器中,而打印机这种输出设备主要用于接收计算的结果并把结果打印出来提供给用户。一台数字计算机可以有多个输入/输出设备,通信口就是一个非常有用的设备,它可以通过因特网与其他用户实现互连。数字计算机是一个功能非常强大的设备,它不仅能够进行算术运算,也能够进行逻辑操作,它还可以根据内部和外部条件做出决策。

商用产品用数字电路来制造有其根本的原因。与数字计算机一样,大多数数字设备都是可编程的。通过改变可编程设备的程序,相同条件下的硬件可以实现许多不同的用途。随着数字集成电路技术的进步,数字设备的成本得到了大幅度的下降。因为单个硅片上集成的晶体管数

目不断增加,功能越来越复杂,每个硅片的成本不断下降,因此数字设备的价格就越来越便宜。由数字集成电路构成的设备每秒钟可以进行几百万次操作。通过纠错编码,数字系统可以非常可靠的运行。一个典型示例就是数字通用光碟(DVD, digital versatile disk),它可以将表示视频、音频的数字信息以及一些其他的数据毫无损失地记录并保存下来。DVD 中以此方式记录的数字信息在播放之前由数字采样来检查码元,任何错误都会被自动检测出来并得到纠正。

数字系统是由各种各样的数字模块构成的。为了理解每个数字模块的作用,必须要掌握关于数字电路及其逻辑功能的基础知识。本书的前 7 章主要介绍了数字设计的基本手段,如逻辑门结构、组合电路与时序电路以及可编程逻辑器件等。第 8 章介绍了寄存器传输级(RTL, register transfer level)的数字设计。第 9 章、第 10 章主要介绍异步时序电路和各种常见的集成电路。第 11 章、第 12 章介绍了一些商用集成电路以及如何将它们用于实验室开展数字电路的实验。

数字设计的一个重要趋势是硬件描述语言(HDL, hardware description language)的使用。HDL 类似于一种编程语言,非常适合于以文本形式来描述数字电路。利用 HDL 可以在硬件电路建立之前模拟和验证一个数字系统的功能,HDL 也可以和逻辑综合工具结合在一起用于数字系统的自动设计。数字电路的 HDL 描述将贯穿全书。

如前所述,数字系统处理以二进制形式表示的离散信息值。用来计算的操作数可以表示成二进制数的形式。其他离散元素,包括十进制数,也可以用二进制码来表示。数据的处理主要通过二进制逻辑单元来实现,而数值量则存储在二进制存储单元中。本章主要介绍各种二进制概念,为后续章节的进一步学习提供一个基本参考框架。

1.2 二进制数

十进制数 7392 代表的是一个数值,该值等于 7 个 1000 加 3 个 100,加 9 个 10,再加上 2 个 1。千、百等分别是 10 的不同次幂,幂次由各个系数所在的位置来确定。更确切地讲,7392 可以写成:

$$7 \times 10^3 + 3 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 2 \times 10^0$$

然而,按照惯例一般只写系数,并从它们的位置推断出 10 的幂次。总之,一个带小数点的十进制数可以用以下按位置记数的系数序列来表示:

$$a_5 \ a_4 \ a_3 \ a_2 \ a_1 \ a_0 \cdot a_{-1} \ a_{-2} \ a_{-3}$$

系数 a_j 是十个数字(0, 1, 2, ..., 9)中的某个数,下标值 j 给出了位置值。因此,系数必须要和 10 的幂次相乘。上式可以展开成:

$$10^5 a_5 + 10^4 a_4 + 10^3 a_3 + 10^2 a_2 + 10^1 a_1 + 10^0 a_0 + 10^{-1} a_{-1} + 10^{-2} a_{-2} + 10^{-3} a_{-3}$$

由于只使用 10 个数字,每个系数均要与 10 的幂相乘,因此,十进制被称为基 10 或基数为 10。二进制是一个不同的数制。二进制数的系数只有两个可能值:0 或 1,每个系数 a_j 都要乘以 2^j 。例如,与二进制数 11010.11 相等的十进制数是 26.75,系数和 2 的幂相乘后的展开式如下:

$$1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = 26.75$$

由此可以推广到以 r 为基数的任何进制,即:

$$a_n \cdot r^n + a_{n-1} \cdot r^{n-1} + \cdots + a_2 \cdot r^2 + a_1 \cdot r + a_0 + a_{-1} \cdot r^{-1} + a_{-2} \cdot r^{-2} + \cdots + a_{-m} \cdot r^{-m}$$

系数 a_j 的取值范围是 0 到 $r-1$ 。为了区分不同进制的数,一般将按位置记数法所表示的数用

括号括起来,并在其右下角标注一个该进制的下标(十进制数或明显可以看出是十进制数时可省略下标)。例如一个5进制数为:

$$(4021.2)_5 = 4 \times 5^3 + 0 \times 5^2 + 2 \times 5^1 + 1 \times 5^0 + 2 \times 5^{-1} = (511.4)_{10}$$

基数为5,各系数的取值只可能为0,1,2,3,4。八进制数的基数为8,有八个数字符号:0,1,2,3,4,5,6,7。如有一个八进制数为127.4,为了得到与其相等的十进制数,我们将其按8的幂次进行展开:

$$(127.4)_8 = 1 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 4 \times 8^{-1} = (87.5)_{10}$$

注意,8和9这两个数字不能出现在八进制数中。

当一个数的基数小于10时,通常是从十进制系统中借需要的 r 个数字当系数。而当其基数大于10时,就用字母表中的字母作为10个十进制数的补充。例如,在十六进制(基数16)系统中,前十个数字(0~9)来自于十进制系统,而字母A,B,C,D,E和F分别用来表示数10,11,12,13,14和15这六个数字。例如一个十六进制数为:

$$(B65F)_{16} = 11 \times 16^3 + 6 \times 16^2 + 5 \times 16^1 + 15 \times 16^0 = (46\,687)_{10}$$

如前所述,二进制位又称为位。当一位等于0时,它在转化的过程中对结果是没有影响的。因此,将一个二进制数转化为十进制数,就是把位为1的那些位置所对应的2的幂数相加。例如:

$$(110101)_2 = 32 + 16 + 4 + 1 = (53)_{10}$$

该二进制数中有四个1,其对应的就是四个以2为底的幂数的和。表1.1中列出了2的 n 次幂所表示的24个数。在计算机工作中, 2^{10} 用K(kilo)来表示, 2^{20} 用M(mega)表示, 2^{30} 用G(giga)表示, 2^{40} 用T(tera)表示。因此, $4\text{ K} = 2^{12} = 4096$, $16\text{ M} = 2^{24} = 16\,777\,216$ 。计算机的存储容量通常用字节数来表示。一字节等于八个比特,可以表示键盘上的一个字符。计算机上一个4 G的硬盘就能够容纳 $4\text{ G} = 2^{32}$ 字节的数据(大约40亿个字节)。

表 1.1 2 的幂所对应的数

n	2^n	n	2^n	n	2^n
0	1	8	256	16	65 536
1	2	9	512	17	131 072
2	4	10	1024	18	262 144
3	8	11	2048	19	524 288
4	16	12	4096	20	1 048 576
5	32	13	8192	21	2 097 152
6	64	14	16 384	22	4 194 304
7	128	15	32 768	23	8 388 608

r 进制数的算术运算规则与十进制数相同。当采用非十进制数时,就必须小心地使用 r 个允许的数。对两个二进制数进行加法、减法和乘法的示例如下:

被加数:	101101	被减数:	101101	被乘数:	101
加数:	<u>+ 100111</u>	减数:	<u>- 100111</u>	乘数:	<u>× 101</u>
和:	1010100	差:	000110		1011
					0000
					<u>1011</u>
				积:	110111